

与散裂中子靶物理相关的理论计算程序探讨*

I 薄靶计算

樊 胜, 于洪伟, 申庆彪, 赵志祥

(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘 要: 利用中能强流质子加速器形成的散裂中子源作为外加中子源驱动次临界反应堆的洁净核能系统是目前国际上的一个研究热点. 散裂中子源是这个系统的一个重要部分, 也是一个急需解决的重点. 有关散裂靶物理的理论计算程序的建立和基准检验是目前工作的一个重点.

关键词: 加速器驱动洁净核能系统; 散裂中子源; 理论计算程序

中图分类号: O571.53; O41 **文献标识码:** A

1 引言

近几年来, 加速器驱动洁净核能系统(ADS)作为可使核能大规模、可持续发展的创新技术路线, 在国际上形成了一个研究热点^[1-3]. ADS 利用中能强流加速器加速质子轰击重靶作为外加中子源, 驱动次临界反应堆. 因此研究该系统所需要的核数据比压水堆(PWR)有更多的要求, 特别是中高能核数据. 例如, 与散裂中子靶有关的核反应数据; 作为结构材料与堆内中高能粒子相互作用的核数据; 加速器屏蔽以及次临界堆屏蔽需要的核数据; 等. 这些数据包括中子产生靶的中子产额、泄漏中子的能谱和空间分布、靶和靶窗的辐照损伤、散裂碎片在靶内的分布和累计等, 以及次临界反应堆内中高能粒子与结构材料反应截面、辐照损伤等. 涉及到的材料包括^[4]:

- (1) 空气、水: N, O 和 Ar 等;
 - (2) 混凝土: O, Na, Mg, Al, Si, Ca, Mn 和 Fe 等;
 - (3) 结构材料: Cr, Mn, Fe, Co, Ni 和 Zn 等;
 - (4) 加速器结构材料: Al, Cu 和 Fe 等;
 - (5) 靶材料: Bi, Pb, W, Ta, Zr 和 Y 等;
 - (6) 锕系元素: Am, Pu, Np, U 和 Th 等.
- 涉及到的反应过程主要是核内微观反应过程

(薄靶)、散裂反应和粒子在厚靶中的宏观输运过程. 中高能质子轰击薄靶已有一些实验数据^[5], 特别是反应($p, xpyn$)的截面数据以及散裂碎片分布和其激发函数, 因此对理论计算程序进行基准检验通常利用这几个方面的数据. 利用中高能质子与薄靶的相互作用来检验程序计算中能质子和重靶反应主要考虑中子产额、出射中子能谱和空间分布以及散裂碎片在靶内分布的研究等.

2 散裂反应计算程序

1993 年, OECD(NEA)对能够用于散裂反应或中能核反应的理论计算和蒙特-卡罗计算程序作了大量的比对工作^[6], 参加比对的程序大约有世界各主要实验室正在利用的 30 个程序, 这些程序大多是在 NMTC 程序的基础上发展起来的.

散裂反应是 1947 年在 Berkley^[7]发现的. 当年 10 月, Serber R 等就提出了级联-蒸发二步过程理论. 1948 年, Goldberger M L 等在没有计算机的条件下进行了蒙特-卡罗计算. 1972 年, 中子-介子输运程序 NMTC^[8]和 HETC^[9]等都已建立, Takahashi 等^[10]进一步在 NMTC 中加入了高能裂变. 1997 年, 再次更新了 NMTC 中核内二核子碰撞的弹性散射截面和 Δ , π 等粒子的产生截面, 更名为 NMTC/JAERI97^[11].

收稿日期: 2001-11-14; 修改日期: 2002-06-27

* 基金项目: 国家重点基础研究资助项目(G1999022600); 国家博士后基金资助项目

作者简介: 樊 胜(1968-), 男(汉族), 湖南常德人, 博士后, 从事核物理研究.

NMTC 程序利用核内级联-蒸发模型计算入射粒子能量的上限是 3.0 GeV. HETC 考虑了核内级联、预平衡发射、高能裂变和蒸发等过程, 采用核内级联的 Bertini 模型, 利用蒙特-卡罗方法模拟入射粒子(质子、中子、 π 介子、 μ 介子等)在核碰撞过程中产生的粒子的轨迹. 对于核子和核碰撞, 入射粒子能量小于 3.5 GeV 时, 利用核内级联模型计算反应的非弹性碰撞, 大于 3.5 GeV 时, 利用核内级联外推蒸发模型计算. 对于 μ 介子和核碰撞, 这个截断能量值为 2.5 GeV.

LANL 发展了 HETC 程序, 为 LAHET^[12]. LAHET 程序中利用可用于计算氢、氦离子等入射的交替核内级联模型取代 HETC 中的 Bertini 模型, 用费米崩裂模型取代蒸发模型中的轻核崩裂模型, 在核内级联和蒸发过程之间考虑了多步预平衡激子模型(MPE). 把 LAHET 和 MCNP^[13] 连接在一起使用, 称为 LCS^[14] (LAHET-MCNP Codes System)程序系统.

申庆彪等^[15]在基于预平衡激子模型和蒸发模型, 没有考虑核内级联过程的基础上, 把低能核反应向高能方向逼近, 编写了计算程序 CCRMN, 目前计算入射质子能量的上限约为 300 MeV.

Young 等^[16]在 GNASH 程序中考虑了 FKK 理论, 更新了 MPE 过程, 认为在入射质子能量 $E_p \geq 50$ MeV 时, MPE 过程非常重要. 利用更新的 GNASH 程序, 目前计算入射质子能量的上限也约为 300 MeV.

基于对实验测量数据的分析, Letaw 得到了质子入射能 $E_p \geq 20$ MeV 质子非弹截面的系统学公式. 同样的方法, 申庆彪等^[15]得到了一套入射能从几 MeV 到 1 GeV 的质子非弹截面系统学公式:

$$\begin{aligned} \sigma_{nc} &= 0.0426 A^{0.701} f(A) g(E) h(A, E), \\ f(A) &= 1 + 0.0144 \sin(3.36 - 2.82 \log A), \\ g(E) &= 1 - 0.67 \exp\left(-\frac{E}{150}\right) \sin(12E^{-0.289}), \\ h(A, E) &= \left[1 + \frac{0.018A^2 - 1.15A}{E^2}\right]^{-1}. \end{aligned}$$

近年来, QMD^[17]理论在研究高能重离子核反应中取得了很大的成功. 利用 QMD 来研究 (p, xn) 和

(p, xp) 反应的双微分截面, 首先是由 Peilert 等^[18]完成的. Peilert 未考虑质子入射经过一定时间后仍具有较高激发能的余核和碎块的统计衰变过程(SDM). Koji Niita 等^[19]利用 QMD, 并考虑了 SDM 过程, 认为质子入射经过一定的时间后, 仍具有较高激发能的余核和碎块通过蒸发粒子退激, 引入时间参数 t_{sw} . 在 $0-t_{sw}$ 之间, 利用 QMD 进行计算, 在 t_{sw} 以后利用 SDM 计算. 通过对实验数据的拟合, 得到这个时间开关 $t_{sw} \approx 100$ fm/c. 樊胜^[5]在其博士论文中改进了 QMD+SDM 模型, 把统计裂变模型引入 QMD 来研究散裂碎片分布, 得到了较为合理的理论预言^[20, 21].

3 理论(程序)存在的问题

利用 HETC 计算 590 MeV 的质子与 Pb 反应的双微分截面(DDCS)和实验测量结果的比较^[9], 如图 1 所示. 图中折线为 HETC 计算结果, 黑点为实验结果. 在 $E_n > 15$ MeV 时, 计算结果比实验值偏低, 而在 1.5 MeV 以下, 计算结果比实验测量值偏高.

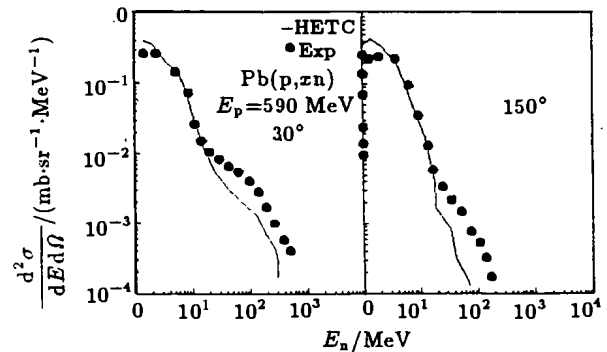


图 1 HETC 计算 $E_p = 590$ MeV $p + {}^{208}\text{Pb}$ 的 (p, xn) 反应的双微分截面与实验测量结果的比较

利用 LAHET 计算的质子和中子入射钨的弹性散射截面和非弹性散射截面的分歧很大^[22], 如图 2 所示. 图中实线是评价的结果, 虚线是 LAHET 计算的结果, 带误差棒的点是实验数据. 从图中可以看出, 在 700 MeV 以上 $p+W$ 的非弹性散射截面, LAHET 计算结果和实验数据符合较好, 而在 100 MeV 以下, LAHET 计算结果偏低, 实验数据达 50%. $n+W$ 的非弹性散射截面在入射中子能量低于 100 MeV 时, 计算结果远低于实验数据.

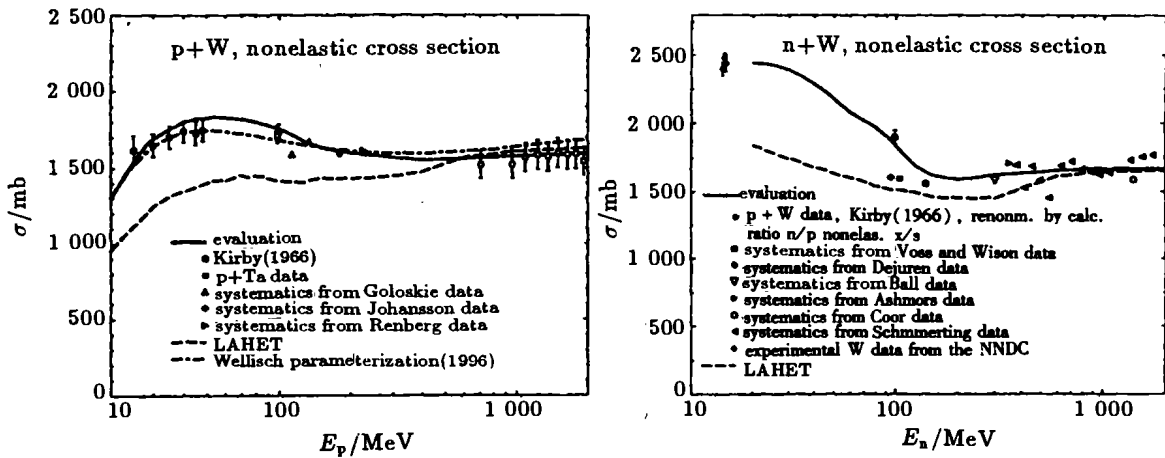


图 2 LAHET 计算 p, n + W 结果和实验数据的比较^[22]

图 3 给出了利用 HETC-KFA 和 LAHET 计算的质子轰击²⁰⁹Bi 的几种散裂碎片的激发函数与实验数据的比较^[23]。可以看出，利用理论程序计算的结果和实验测量值之间有很大的分歧。

利用系统学公式和经验公式计算的结果，较多的依赖于已有的实验数据。对于实验数据少，或没有实验数据的核素和反应，其计算结果的合理性和可靠性有很大的不确定度。而中高能质子与核碰撞反应的实验测量数据较少。对于有实验数据的核

素，拟合结果是可以信赖的。对于没有实验数据的核，系统学中的不依赖物理基础的参数较多。

利用 QMD 计算的中高能质子入射引起的反应，计算结果和实验符合得都较好。Koji Niita 等的 QMD+SDM 人为引入了时间参数 t_{sw} ，通过调整这个参数使计算结果符合实验数据，但他们没有能从理论上对这个时间开关 t_{sw} 给出解释。同时 Koji Niita 利用的 QMD 理论的中子-中子相互作用也未能考虑核系统的对称势能。由于质子入射发射粒子后

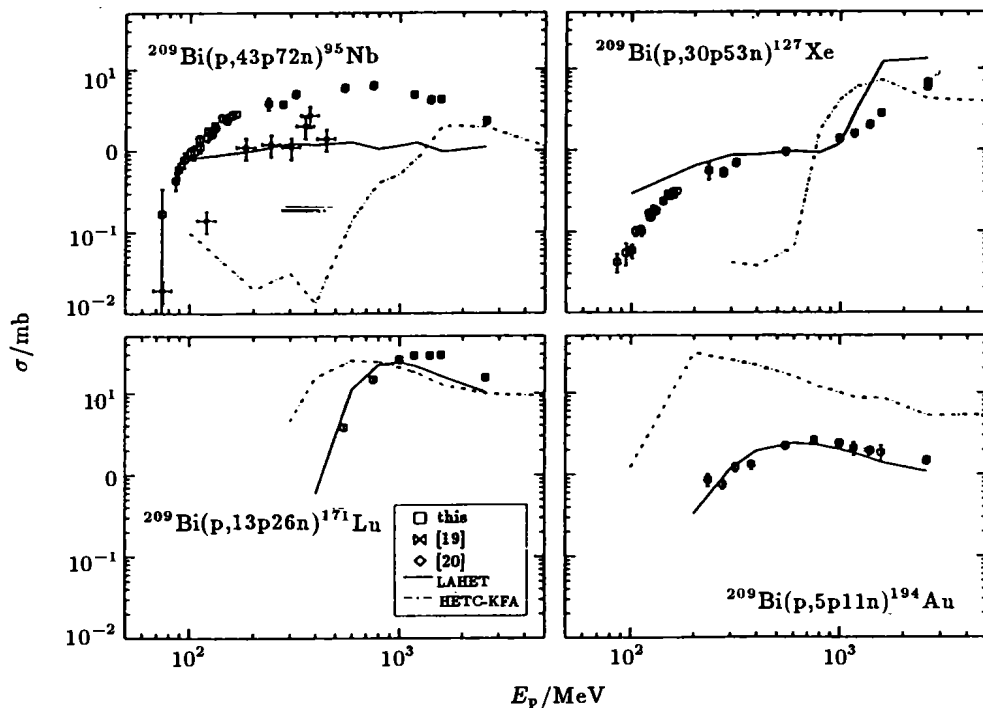


图 3 HETC-KFA(- · -)和 LAHET(—)计算散裂碎片激发函数和实验数据的比较^[23]

的部分余核, 仍具有较高激发能, 可以通过裂变退激, Perleit 和 Koji Niita 的 QMD 均未能考虑裂变, 计算的靶的余核质量分布不可能包含裂变部分.

尽管我们以前的工作^[21, 22]利用 QMD + FIS- SION 计算得到的中高能质子入射的 $(p, xpyn)$ 反应的截面数据以及散裂碎片激发函数和分布很好地再现了实验数据, 但 QMD 计算量非常大, 和宏观输运程序的联接有很大的困难.

4 结论和讨论

散裂中子源是加速器驱动洁净核能系统的一个重要部分, 有关散裂中子靶的相关物理问题也是一

个急需解决的重点. 尽管目前有一些理论程序能开展这方面的工作, 但或多或少地与实验测量结果有一些分歧, 而且相关的理论本身还有不完备, 因此完善这些程序并用于分析散裂中子靶相关物理问题是目前工作的一个重点和难点. 对理论计算程序进行基准检验通常需要利用中高能质子和薄靶相互作用的微观核数据. 利用中高能质子与薄靶的相互作用研究来检验厚靶宏观计算程序是目前研究的一个重要方向. 如: 中能质子和重靶反应的中子产额、出射中子能谱和空间分布以及散裂碎片在靶内分布的研究等.

参 考 文 献:

- [1] Bowman C D, Arthur E D, Lisowskip W, *et al.* Nuclear Energy Generation and Waste Transmutation Using an Accelerator-driven Intense Thermal Neutron Source [J]. Nucl Instr and Meth, 1992, **A320**: 336.
- [2] Carminati R, Klapisch R, Revol J P, *et al.* An Energy Amplifier for Cleaner and Inexhaustible Nuclear Energy Production Driven by Particle Beam Accelerator [R]. CERN/AT. 93-47 (ET), 1993.
- [3] Rubbia C, Rubio A, Buono S, *et al.* Conceptual Design of a Fast Neutron Operated High Power Energy Amplifier [R]. CERN/AT. 95-44(ET), 1995.
- [4] Nakahara Y. Nuclear and Nucleon Data Needs for Incineration of the Radioactive Waste from Fission Reactors with a Proton Accelerator [C]. International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, Julich, 1991. 23.
- [5] 樊 胜. 加速器驱动洁净核能系统中的两个物理问题研究 [D]. 北京: 中国原子能科学研究院, 1999.
- [6] Blann M. International Code Comparison for Intermediate Energy Nuclear Data [R]. NSC/DOC(94)-02, 1994.
- [7] Brobeck W M, Lawrence E O, MacKenzie K R, *et al.* Initial Performance of the 184-inch Cyclotron of the University of California [J]. Phys Rev, 1947, **71**: 449.
- [8] Coleman W A, Wamstrong T W. The Nucleon-meson Transport Code NMTC[R]. ORNL-4606, 1970.
- [9] Cabriel T A, Alsmiller R G, Guthrie M P. An Extrapolation Method for Predicting Nucleon and Pion Differential Production Cross Sections from High-energy(>3 GeV) Nucleon-nucleus Collisions [R]. ORNL-4542, 1970.
- [10] Larson D C. Symposium on Neutron Cross Sections from 10 to 50 MeV [R]. BNL-NCS-51245, 1980.
- [11] Nakahara Y T. NMTC/JAERI A Code System for High Energy Nuclear Reactions and Nucleon-meson Transport Code [R]. JAERI-M 82-198, 1982.
- [12] Prael R E, Michael Bozoian. Adaptation of the Multistage Preequilibrium Model for Monte-Carlo Method(1)[R]. LA-UR-88-3238, Los Alamos National Laboratory, 1988.
- [13] Briesmeister Judith F. MCNP — A General Monte-Carlo N-particle Transport Code [R]. LA-13709-M, 2000.
- [14] Prael R E, Bozoian M. Adaptation of the Multistage Preequilibrium Model for Monte-Carlo Method(1) [R]. LA-UR-88-3238, 1988.
- [15] Cai Chonghai, Shen Qingbiao. Calculation Methods in Program CCRMN[J]. INDC(CPR)-040/L, 1996, **15**: 22.
- [16] Young P G, Chadwick M B. Neutron- and Proton-induced Nuclear Data Libraries to 150 MeV for Accelerator-driven Applications[C]. Nuclear Data for Science and Technology, Reffo G, SIF, Bologna, Italy, 1997, **59**: 1 440.
- [17] Aichelin J, Peilert G, Bohnet A, *et al.* Quantum Molecular Dynamics Approach to Heavy Ion Collisions: Description of the model, comparison with fragmentation data, and the mechanism of fragment formation[J]. Phys Rev, 1988, **C37**: 2 451.
- [18] Peilert G, Konopka J, Stocker H, *et al.* Dynamical Treatment of Fermi Motion I in a Microscopic Description of Heavy Ion Collisions[J]. Phys Rev, 1992, **C46**: 1 457.
- [19] Koji Niita, Satoshi Chiba, Toshiki Maruyama, *et al.* Analysis of the (n, xn) Reactions by Quantum Molecular Dynamics Plus Statistical Decay Model[J]. Phys Rev, 1995, **C52**: 2 620.
- [20] Fan Sheng, Li Zhuxia, Zhao Zhixiang, *et al.* Analysis of Proton-induced Reactions on ^{208}Pb with Incident Energy 590 MeV and 322 MeV [J]. Eur Phys J, 1999, **A4**: 61.

- [21] Fan Sheng, Li Zhuxia, Xiao Yuheng. Fragment Distribution Analysis of Proton-induced Reactions with Intermediate Energy Using Quantum Molecular Dynamics Plus Fission Models [J]. Nucl Sci and Eng, 2001, 137: 89.
- [22] Parel R E, Chardwick M B. Applications of Evaluated Nuclear data in the LAHET Code[C]. Nuclear Data for Science and Technology, Reffo G, SIF, Bologna, Italy, 1997, 59: 1 449.
- [23] Gloris M, Michel R, Sudbrock F, *et al.* Proton-induced Nuclide Production in Heavy Target Elements at Medium Energies[C]. Conf. Proc. Nuclear Data for Science and Technology, G. Reffo, SIF, Bologna, Italy, 1997, 59: 1 429.

Theoretical Programs Related to Spallation Neutron Source for ADS* I Thin Target Simulations

FAN Sheng, YU Hong-wei, SHEN Qing-biao, ZHAO Zhi-xiang
(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract: The research for intermediate energy proton accelerator driven radiologically clean nuclear power system has attracted considerable attention. The spallation neutron source induced by intermediate energy proton-nucleus interaction is a key point and has not solved yet for the transmutation and applications. The theoretical programs related to the spallation neutron source for accelerator driven system (ADS) are discussed at present work.

Key words: accelerator driven system; spallation neutron source; theoretic program

* **Foundation item:** National Key Item of Foundation Research and Development Project of China (G1999022600); Foundation for Ph. D. Training program of China